

岩溶隧道建设引起的地下水环境负效应研究 ——以铜锣山隧道为例^{*}

刘建, 刘丹

(西南交通大学 环境科学与工程学院, 成都 610031)

摘 要: 岩溶地区隧道工程建设引起的地下水环境负效应屡见不鲜。本文在借鉴国内外地下水环境影响评价相关研究成果的基础上, 提出了岩溶地区隧道工程地下水环境负效应评价指标体系, 并采用层次分析法确定了各指标的权重。经用于铜锣山隧道实例研究, 得出该隧道建设产生的地下水环境负效应为 II 级(较弱)的结论, 这与实际调查结果较为相符, 表明文中建立的评价指标体系和采用的评价方法较合理, 可为类似隧道工程的地下水环境负效应研究与评价提供实用参考。

关键词: 隧道; 地下水; 负效应; 指标体系; 层次分析法

中图分类号: TU311.3; PTV211.12

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0268-04

Study on Groundwater Negative Effects Resulted by Tunnel Construction in Karst Areas —A Case Study of Tongluoshan Tunnel

LIU Jian, LIU Dan

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Groundwater negative effects resulted by tunnel engineering construction is not uncommon in karst areas. On the basis of some researches about groundwater environmental impact assessment, this paper proposes an index system to evaluate groundwater negative effects resulted by tunnel engineering in karst areas and adopts AHP to determine the weight of each index. By using it to Tongluoshan tunnel, it produces an ultimate level that is II (little weak) which conforms to the actual survey results, making clear that the index system established in this paper is reasonable, and it can be used to groundwater negative effects evaluation for similar tunnel engineering.

Key words: tunnel; groundwater; negative effects; indexes system; Analytic Hierarchy Process(AHP)

我国是世界上岩溶分布面积最广的国家之一, 仅裸露于地表的碳酸盐岩面积就达 91 万 km², 接近于我国国土面积的 1/10。如此广阔的岩溶分布, 严重影响着我国交通基础设施的建设和发展。据统计资料, 占我国已建成大隧道(长度大于 3 km)总数 41.27% 的隧道修建过程中, 几乎不同程度遇到了岩溶地下水的危害, 其中又以突水突泥最为严重^[1]。除此之外, 岩溶地区修建隧道工程还易引起区域地下水位下降、地面沉降、岩溶塌陷、地下水污染、结构腐蚀和生态环境退化等一系列地下水环境负效应问

题^[2-4], 不仅危及隧道施工安全、影响施工进度, 而且极大地恶化当地环境。通过建立合理的评价指标体系, 科学、准确评价岩溶地区隧道工程建设引起的地下水环境负效应问题, 无疑有助于优化隧道工程选址、确保隧道施工和运营安全, 同时也有利于保护隧道区生态环境。

1 铜锣山隧道工程概况

铜锣山越岭双洞公路隧道全长 5.2 km, 最大埋深 280 m, 建筑限界为高 5 m、宽 10.25 m, 洞间距 30

^{*} 收稿日期: 2008-10-31

基金项目: 四川省交通厅科学技术研究项目(05009)

作者简介: 刘建(1982-), 男, 四川威远人, 博士研究生, 主要从事工程环境控制技术研究。E-mail: liukai-102@163.com

m,“人”字形纵坡。该隧道位于四川省邻水县元市镇和城南镇之间的铜锣上背斜中段,东距重庆约 80 km,西至成都约 310 km,始建于 2005 年,已于 2008 年夏季贯通。

隧址区地貌景观主要呈一山(铜锣山)两岭(翼部碎屑岩与可溶岩附近)夹一谷(岩溶槽谷)的特征,区内多年平均降水量为 1 215.5 mm(主要集中在 7-9 月),多年平均气温为 16.9℃,清水溪是岩溶槽谷内发育流量最大的常年性溪流(平均流量约 71.50 L/s),与隧道中线相距约 335 m。隧址区地处新华夏系四川台坳之川东褶皱带的铜锣山背斜,出露地层主要有三迭系下统嘉陵江组、中统雷口坡组、上统须家河组及侏罗系地层。除第四系松散堆积物仅分

布在槽谷和地形低洼处,其余地层大面积出露,岩性主要为可溶岩(灰岩及白云岩)和非可溶岩(砂岩、粉砂岩、泥岩等),前者(分布于槽谷)被挟持于后者(地处两岭地带)中。

2 岩溶地区隧道工程地下水环境负效应评价指标体系

2.1 评价因子及评价标准

本文在借鉴国内外地下水环境影响评价相关研究成果的基础上^[5-8],提出了包括地表汇水面积、地层岩性和隧道埋深等 20 项评价指标在内的岩溶地区隧道工程地下水环境负效应评价指标体系,各指标及其评价标准见表 1。

表 1 岩溶地区隧道工程地下水环境负效应评价指标体系及评价标准

评价指标			评价等级及标准				
目标层	准则层	指标层	很弱(Ⅰ)	较弱(Ⅱ)	中等(Ⅲ)	较强(Ⅳ)	很强(Ⅴ)
[A] 隧 道 工 程 地 下 水 环 境 负 效 应	[B1] 自然 地理	[C11]地表汇水面积/ km ²	< 10	10~ 20	20~ 40	40~ 80	> 80
		[C12]多年平均降雨量/ mm	< 200	200~ 400	400~ 800	800~ 1600	> 1600
		[C13]多年平均蒸发量/ mm	> 800	800~ 600	600~ 400	400~ 200	< 200
		[C14]降水入渗系数	< 0.05	0.05~ 0.15	0.15~ 0.25	0.25~ 0.35	< 0.35
		[C15]隧道与地形地貌关系	其他	单斜面型	山谷侧下方平行型	横贯河流型	山谷正下方平行型
	[B2] 地质、 水文 地质	[C16]地表水库、湖泊规模/ m ³	< 10 ⁴	10 ⁴ ~ 10 ⁵	10 ⁵ ~ 10 ⁶	10 ⁶ ~ 10 ⁷	10 ⁷ ~ 10 ⁸
		[C17]地表河流规模/ (m ³ · s ⁻¹)	< 0.1	0.1~ 0.5	0.5~ 2	2~ 10	> 10
		[C21]地层岩性	泥岩、页岩、粘土岩	砂岩、细砂岩	风化花岗岩、火成岩	风化变质岩	石灰岩等可溶岩类
		[C22]褶皱发育状况	无褶皱或有小褶皱	平缓褶皱	不对称褶皱	裂隙发育的褶皱	断层发育的褶皱
		[C23]地下水补、径、排条件	补给区	弱补给区	弱径流区	强径流区	排泄区
		[C24]可溶岩出露面积比率/ %	< 30	30~ 50	50~ 70	70~ 90	> 90
		[C25]破碎带发育程度	不发育	较差	一般	较发育	发育
		[C26]地下水埋深/ m	> 50	50~ 30	30~ 10	10~ 5	< 5
		[C27]岩层富水性	不含水	微含水	中等含水	较含水	富含水
		[C28]地下水化学类型	HCO ₃ 型	HCO ₃ - SO ₄ 型	SO ₄ 型	Cl- SO ₄ 型	Cl 型
		[C31]隧道埋深/ (10 ² m)	< 1	1~ 3	3~ 5	5~ 10	> 10
		[C32]隧道影响范围/ km	< 0.4	0.4~ 1	1~ 2	2~ 3	> 3
		[C33]隧道长度/ km	< 0.5	0.5~ 1	1~ 3	3~ 10	> 10
		[C34]开挖断面面积/ m	< 35	35~ 70	70~ 140	140~ 280	> 280
		[C35]施工方法	TBM 法	新奥法	钻爆法 分部开挖	钻爆法 台阶法	钻爆法 全断面

上述 20 项指标从隧址区自然地理环境、地质-水文地质条件和隧道工程因素等不同角度出发,力求尽可能的全面反映影响地下水的相关因素,最终达到科学评价的目的。

2.2 指标权重的确定

权重在评价过程中的作用非常重要,它反映了

各个指标所占地位或所起的作用,并直接影响最终评价结果。现阶段确定权重的方法主要有经验法、统计法、模糊协调决策法、模糊关系方程法、层次分析法和熵权法等^[9],本文选用其中已在 30 多个领域得到广泛应用的层次分析法(Analytical Hierarchy Process, AHP)^[10],并有幸得到在铁道部第一勘察

设计研究院、四川省交通厅、四川省煤田地质工程勘察设计研究院和成都理工大学等单位任职的 9 位专家对文中所建立指标体系进行赋权。经计算后,各指标的综合权重见表 2。

表 2 各指标综合权重表

指标	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C21	C22	C23
综合权重	0.0249	0.0017	0.0322	0.0110	0.0274	0.0064	0.0059	0.0223	0.0187	0.0654
指标	C24	C25	C26	C27	C28	C31	C32	C33	C34	C35
综合权重	0.3789	0.1164	0.0300	0.0182	0.0031	0.0743	0.0571	0.0414	0.0292	0.0355

2.3 评价方法

本文采用目前在各研究领域广泛应用的模糊综合评价法^[11-13],通过计算模糊关系矩阵 R ,由 $B=W \cdot R$ (W 为权重向量)计算出综合评价结果向量 B 。

3 铜锣山隧道建设引起的地下水环境负效应评价与分析

3.1 铜锣山隧道建设引起的地下水环境负效应评价
根据铜锣山隧道工程的地质详勘报告和岩溶水专

由表 2 可以看出: C24(可溶岩出露面积比率)的权重最大,表明它对整个评价结果的影响尤为突出;反之,C12(多年平均降雨量)的权重最小,表明它对整个评价结果的影响十分有限。

项报告,结合笔者所在课题组的实地调查情况,铜锣山隧道各评价指标的量化结果见表 3。

根据表 3 的量化结果,运用模糊数学理论,采用较为成熟的降半梯形^[14]分布曲线作为隶属函数得到如下模糊关系矩阵

利用公式 $B=W \cdot R$, 可得最终计算结果如下:

$B= \{0.1175, 0.3900, 0.2383, 0.1869, 0.067\}$

由此可知,铜锣山隧道施工引起的地下水环境负效应为II级(较弱)。

表 3 铜锣山隧道工程评价指标量化结果

指标	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C21	C22	C23
量化结果	38.4	入渗系数 0.55 占	1215.5	约 40% 为平行山谷	510	300000	0.3	泥 岩、页岩、粘土	一般	裂隙发育的褶皱 (铜锣山背斜)
		44%, 入渗系数0.20		岩占 39%, 砂岩、						
		占 32%, 入渗系数		细砂岩占 35%, 石						
		0.054 占 24%		灰岩等 可溶岩类 占 36%						
指标	C24	C25	C26	C27	C28	C31	C32	C33	C34	C35
量化结果	强径流区	35	弱: 62.37%, 中等 30.14%;强: 7.5%	HCO ₃ 型	> 50 m 占 57%, < 50 m 占 43%	> 100 m 和 100~ 300 m 的 各 约 占 50%	1.02 km	5.2	185 m ²	台阶法占 0%, 全 断面法占 80%

$$R= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.230 & 0 & 0 & 0 & 0.39 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.43 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.170 & 0 & 1 & 0.058 & 0.25 & 0 & 0 & 0.62 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.714 & 0 & 0 & 0 \\ 0.72 & 0 & 0.95 & 0.160 & 0.4 & 0 & 0.411 & 0 & 1 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.286 & 0.238 & 0.2 & 0 \\ 0.28 & 0.961 & 0 & 0.245 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.762 & 0.8 & 0.289 \\ 0 & 0.039 & 0 & 0.195 & 0.6 & 0 & 0 & 0.36 & 0 & 0 & 0.08 & 0 & 0 & 0.57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.711 \end{bmatrix}^T$$

3.2 评价结果分析佐证

为判断上述评价结果是否合理, 以下将从隧址区环境负效应的实地调查结果、长观点流量动态变化特征、隧址区气候特征、隧道疏干范围和隧道涌水量等 5 个方面分别加以分析。

(1) 环境负效应调查结果。铜锣山隧道建设过程中虽出现洞内围岩失稳、局部地段因围岩水压力增大而破坏衬砌和地表部分井泉流量减少甚至枯竭, 但在地表尚未发现因本工程建设而导致的岩溶塌陷、地面

沉降等现象, 由此说明该隧道工程建设却产生了一些地下水环境负效应, 但就调查结果看, 其影响程度尚不算严重。

(2) 长观点流量动态变化特征。隧址区内共布设 13 个井泉水长观点, 按其流量对降雨的响应关系可分为“快升快降型”、“快升缓降型”、“反应迟钝型”和“相对稳定型”4 种(限于篇幅, 未附详图), 各种类型所占的比例依次为 38.46%, 30.77%, 15.38%, 15.38%, 由此可见大部分的井泉对降雨有较为及时的响应。而从隧道涌水与降雨的关系看(图 1), 二者之间并无明显的对应

关系,说明隧道围岩介质仍以裂隙或溶隙为主,涌水来源主要为含水层中的储存量,出水形式以渗流占优,故对降雨响应不明显。另外,在非降雨时隧道内仍发生了几次涌水量介于 40~ 80 L/s 的较大涌水(如 2006-07-20, 2006-08-09, 2007-04-30, 2007-06-22, 2007-07-04),这是因为在隧道开挖过程中,揭穿某一储存量相对较大的含水岩体所致,在其快速疏干后隧道涌水量又恢复到原有水平。因此,从长观点和隧道涌水的流量动态变化特征看,隧道涌水与地表井泉水并不具有良好的相关关系。

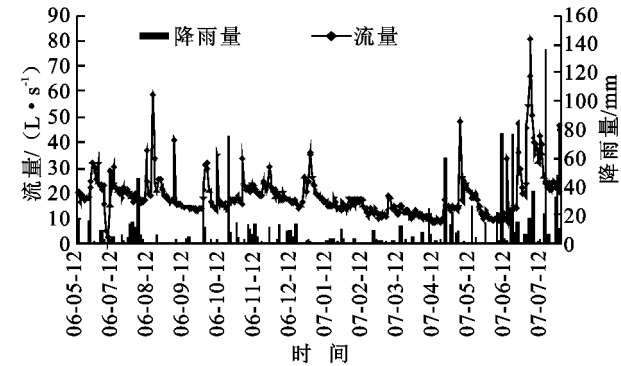


图 1 铜锣山隧道涌水与降雨关系图

(3) 隧址区气候特征。2006 年 5 月 12 日至 2006 年 12 月 31 日,隧址区最大降雨量为 75.3 mm,总降雨量为 567.2 mm,属 50 a 一遇的伏旱。而根据地表长观点流量动态变化特征和同位素分析结果,地表井泉水主要接受降水补给,因此,在此期间其流量衰减甚至枯竭就不能全归结于是隧道疏干所致,而是与当地的气候特征有着紧密联系。

(4) 隧道疏干范围。四川省煤田地质工程勘察设计院对铜锣山隧道地下水疏干范围的调查结果表明,其影响范围主要分布在隧道两侧各约 1 km 范围内(隧道中部可溶岩地区最大,两侧非可溶岩地区较小,约 100~ 500 m),作者所在课题组利用水质灰色关联分析结合长观点流量动态变化曲线也得出了大致相同的结果,但这一结果在我国类似岩溶地区隧道工程建设过程中却属较小值^[15]。

(5) 隧道涌水量。铜锣山隧道实测最大涌水量约 6 000 m³/d(平均 1 700 m³/d),与同在碳酸盐地区的梅子隧道、大巴山隧道、南岭隧道等工程的涌水量相比^[16],其值亦较小,致使对含水层的疏干范围有限。

综上,利用本文建立的岩溶地区隧道工程地下水环境负效应评价指标体系来评价铜锣山工程施工引起的地下水环境负效应,所得结果和实际调查情况较相符合,表明文章构建的评价指标体系具有一定的合理性,这对于类似隧道工程地下水环境效应研究与评价具有实用参考价值。

4 结语

岩溶地区因兴建隧道工程而引起的地下水环境负效应屡见不鲜。本文建立了岩溶地区隧道工程地下水环境负效应评价指标体系,并将其应用于铜锣山隧道工程,不失为一次较为成功的尝试。但限于现有条件,本文构建评价指标体系的全面性以及各指标权重的合理性尚需进一步探讨和更多的工程实例加以验证。

参考文献:

- [1] 刘招伟,张民庆,王树仁. 岩溶隧道突变预测与处置技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 107-110.
- [3] 王勐,许兆义,王连俊,等. 圆梁山毛坝向斜段隧道涌突水灾害及对地下水的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 6-10.
- [4] 高辛财,刘维宁. 隧道施工期间的环境保护分析与对策[J]. 铁道建筑技术, 2003(1): 38-40.
- [5] 刘向远. 岩溶隧道施工中地下水环境负效应评价指标体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [6] 赫英臣,孟伟,郑丙辉. 固体废物安全填埋场选址与勘察技术[M]. 北京: 海洋出版社, 1998.
- [7] 杨泽元,王文科,王雁林. 表生生态效应及其评价指标体系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 105-111.
- [8] Maria V E, Carlos D D. Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico [J]. Environmental Management, 2002, 29(2): 266-278.
- [9] 王鹤,曾鸣,陈珊,等. 基于模糊层次分析法的供电服务质量综合评价模型[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 92-96.
- [10] Wasil E, Golden B. Celebrating 25 years of AHP-based decision making[J]. computers and operating research, 2003, (30): 1419-1420.
- [11] 张霞,于天彪,梁宝珠,等. 基于层次分析法与模糊综合评价的供应商评价研究[J]. 东北大学学报, 2006, 27(10): 1142-1145.
- [12] 周庆文,李慧民,汤倩,等. 模糊综合评判在西部区域规划中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(1): 156-159.
- [13] 李佩,杨伟. 改进层次分析法和模糊灰色理论的管道土壤腐蚀评价[J]. 油气储存, 2006, 25(4): 27-35.
- [14] 张震斌,苑宏刚,周立岱. 模糊综合评判理论在地下水污染评价中的应用[J]. 资源环境与发展, 2006(1): 41-44.
- [15] 吴治生. 不同地质边界条件岩溶隧道涌水量预测及展望[J]. 铁道工程学报, 2007(11): 48-56.
- [16] 朱大力,李秋枫. 预测隧道涌水量的方法[J]. 工程勘察, 2000(4): 18-23.